УДК: 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ БЛЕСКА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО ИХ ОБНАРУЖЕНИЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СРЕДСТВАМИ

Д.В. Фролов, А.И. Паняев, Т.В. Осипова (Санкт-Петербург)

В настоящее время космические аппараты (КА) применяются для решения различных задач военного и двойного назначения: дистанционного зондирования Земли и разведки из космоса наземных, морских, воздушных и космических объектов, обнаружения стартов баллистических ракет (БР) и ядерных взрывов, связи и передачи данных, космической навигации, метеоразведки, топогеодезии, космической инспекции и др. [1]. Указанные КА могут иметь размеры с учетом развития нанотехнологий от нескольких сантиметров. Уменьшение размеров и массы космической техники ставит новую задачу, связанную с возможностью обнаружения космических объектов (КО) такого класса.

Для оптико-электронных средств (ОЭС), которые могут стать единственными средствами, способными решать указанную задачу, обнаружение малоразмерных объектов (МРО) связано прежде всего с уменьшением эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), что неизбежно при снижении их массы. Малая величина ЭПР может ограничить возможности ОЭС по обнаружению МРО.

Для оценки способности ОЭС обнаруживать МРО требуется определить связь между массой КО и его габаритными размерами, на основе чего провести оценку возможных значений ЭПР и характеристик их обнаружения.

Для получения расчетов применялась компьютерная модель [4]. Достоинством данной модели является возможность анализа качества работы оптико-электронных средств наземного базирования по обнаружению комического мусора в различных условиях оптической видимости. Однако модель не позволяет оценить соответствие предельного значения блеска КА и его массогабаритных размеров.

С этой целью был проведѐн анализ данных по результатам запусков космических аппаратов (КА) в период с 2010 по 2019 годы. Графики, иллюстрирующие изменение объѐма (график 1) запускаемых КА и их массы (график 2) приведены на рисунке 1.

По результатам анализа можно сделать вывод, что наблюдается тенденция к снижению массы и размеров, запускаемых КА.

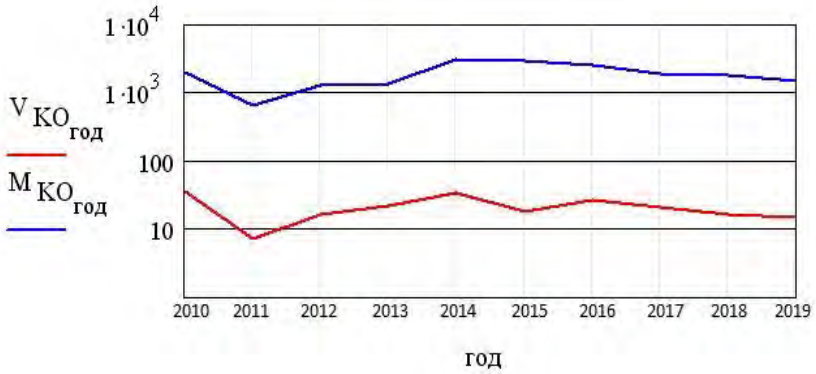

Рис.1 – Анализ изменения объема и массы запускаемых КА за 2010-2019 годы

Так как КО, имеющие сложную форму поверхности, на практике моделируют эквивалентной сферой, то на основе полученного коэффициента проведѐн расчѐт

зависимости радиуса эквивалентной сферы R, аппроксимирующей поверхность КО, от его массы M_{KO} и построен график, приведенный на рисунке 2. Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением массы КО, например, до 10 кг радиус аппроксимирующей сферы может составлять размер около 30 см, при весе в 1 кг – 15 см. При дальнейшем снижении массы запускаемых МР КА, например до 100 г и меньше, радиус аппроксимирующей сферы может достигать 5 см.

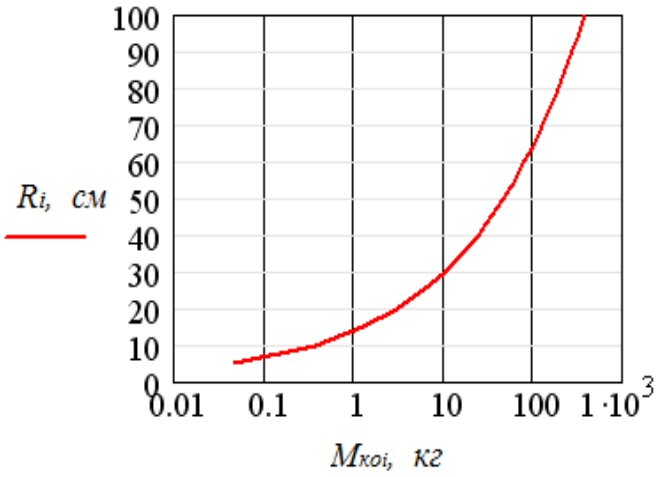

Рис. 2 – Зависимость радиуса эквивалентной сферы космического объекта R_i от его массы M_{KOi}

Таким образом, в целях оценки возможности обнаружения МР КО с применением ОЭС при дальнейшем моделировании следует рассматривать ЭПР КО с радиусами аппроксимирующей сферы, размеры которых начинаются от 5 сантиметров. Уточним понятие ЭПР и определим еѐ предельные значения для МР объектов.

Для выбранной модели поверхности космического объекта солнечное излучение, падающее на поверхность сферы, засвечивает только еѐ половину [2,3]. Площадь освещѐнной солнечным потоком полусферы $S_{псф}$ определяется зависимостью вида:

$$S_{псф} = 2 \cdot \pi \cdot R^2, \quad (1)$$

где R – радиус эквивалентной сферы космического объекта.

Эффективная поверхность рассеяния КО – это воображаемый плоский эквивалент поверхности КО, который диффузно рассеивает упавшую на него световую волну в переднюю полусферу, определяемую угловой мерой π, создавая в точке приема такую же освещенность, как и реальный объект. Аналитическое выражение для моделирования эффективной поверхности рассеяния L имеет вид:

$$L = S_{псф} \cdot \rho \cdot \cos^2 \Theta, \quad (2)$$

где ρ – интегральный коэффициент отражения КО (альбедо) в видимой области спектра, усредненный по поверхности объекта;

Θ – фазовый угол.

Моделирование блеска КО m_{KO}, выраженного в звѐздных величинах, в зависимости от его эффективной площади рассеяния L и высоты орбиты H выполняется в следующем порядке.

Для определѐнности орбиты принимаем круговыми. Минимальную высоту орбиты H определим в 100 км. Максимальную – равной 35870 км, шагом k ($k = 0 \ldots N_H$, где $N_H = 72$) дискретного счѐта по высоте орбит определим в 500 км.

Вводим константы:

– солнечную постоянную E_C, равную 135000 лк;

– альбедо КО $\rho = 0{,}3$;

– коэффициент пропускания атмосферы $\tau_{атм}$, равный 0,7.

Задаѐм значения фазового угла, определяемого от КО между направлениями на Солнце и на ОЭС.

Фазовый угол, при котором обеспечивается видимость всей освещѐнной Солнцем полусферы, аппроксимирующей поверхности КО, обозначим $\Theta_{\min}$ и приравняем его к нулю градусов.

Фазовый угол, при котором обеспечивается минимальная видимость поверхности КО, освещѐнной потоком от Солнца, обозначим $\Theta_{\max}$ и зададим его равным 90 градусам.

Проводим оценку минимальной и максимальной величины блеска КО, имеющего заданные радиусы сферы R_i и высоты H.

При максимальном фазовом угле в сторону ОЭС, наблюдаемой за КО, поверхностью объекта будет рассеиваться минимальный световой поток, который в апертурной плоскости ОЭС создаст освещѐнность, соответствующую максимальной величине блеска m_{max}, пересчитанной в звѐздные величины [2]:

$$m_{\max_{i,k}} = -13{,}^{m}89 - 2{,}5\lg\left(\frac{2 \cdot E_c \cdot L \cdot \tau_{атм}}{3 \cdot \pi \cdot (H_{KO_k})^2}\right) \cdot [\sin\Theta_{\max} + (\pi - \Theta_{\max})\cos\Theta_{\max}], \qquad (3)$$

Аналогичная формула для расчѐта минимальной величины блеска, соответствующей максимальной величине освещѐнности, при минимальном значении фазового угла имеет вид:

$$m_{\min_{i,k}} = -13{,}^{m}89 - 2{,}5\lg\left(\frac{2 \cdot E_c \cdot L \cdot \tau_{атм}}{3 \cdot \pi \cdot (H_{KO_k})^2}\right) \cdot [\sin\Theta_{\min} + (\pi - \Theta_{\min})\cos\Theta_{\min}], \qquad (4)$$

На рисунке 3 представлены графики зависимости площади эквивалентной полусферы (график – красная линия) и соответствующей ей эффективной поверхности рассеяния (график – синяя линия) от радиуса R_i аппроксимирующей сферы.

Результаты моделирования показывают, что при наблюдении КО под фазовым углом $\Theta_{\min} = 0^0$ радиус аппроксимирующей сферы R при заданном значении альбедо КО ρ будет в 1.29 раза больше радиуса эффективной поверхности рассеяния КО (для случая, когда эффективная поверхность рассеяния КО представлена площадью круга).

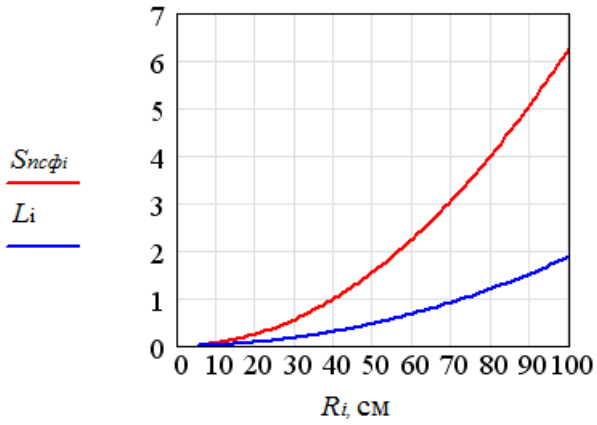

Рис. 3 – Зависимость $S_{псфi}$ и L_i от радиуса R_i

На рисунке 4 представлен результат моделирования по приведенной методике предельных значений блеска КО, имеющих различный радиус эквивалентных сфер и находящихся на высотах, соответствующих геостационарным орбитам. Анализ графиков показывает, что при благоприятных условиях наблюдения (при минимальном угле Θ ─ график 2) блеск КО будет превышать величину в 15^m (величина проницающей способности лучших аналогов ОЭС) для объектов с диаметром эквивалентной сферы менее 34 см. При фазовом угле, который равен 90^0, ту же звѐздную величину будут превышать КО с диаметром эквивалентной сферы менее 60 сантиметров. Космические объекты с диаметром эквивалентной сферы ~ 10 см на геостационарных орбитах могут иметь максимальную величину блеска (18^m - 19^m).

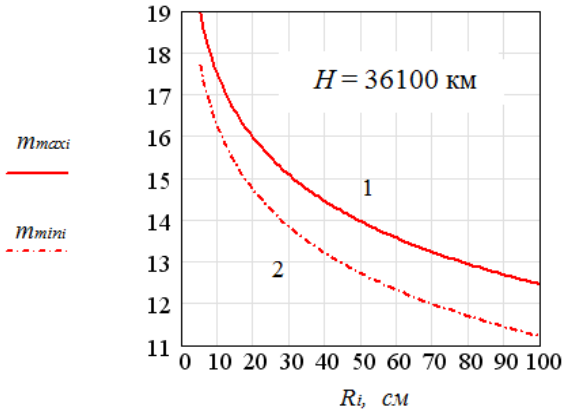

Рис. 4 – Зависимость предельных значений m_{maxi}, m_{mini} от эквивалентной сферы с радиусом R_i

На рисунке 5 представлены графики зависимости предельных значений блеска КО от его высоты орбиты. Графики 1, 2 и 3 (сплошная линия) иллюстрируют изменение блеска КО в зависимости от высоты орбиты при фазовом угле наблюдения, равном 90^0. При этом графики со сплошной линией (1 – красного цвета, 2 – синего цвета, 3 – коричневого цвета) показывают изменение блеска для МР КО с радиусом эквивалентной сферы, равным 5 см, 31 см и 1 м соответственно. Графики 1, 2 и 3 (штрихпунктирная линия) иллюстрируют изменение блеска КО в зависимости от высоты орбиты при $\Theta = 0^0$ и радиусах эквивалентной сферы, равных 5 см, 31 см и 1 м соответственно. Для других размеров радиуса эквивалентной сферы в пределах от 5

см до 1 м блеск КО будет изменяться в диапазоне между приведенными предельными значениями на графиках 1 и 3.

Из результатов моделирования следует вывод, что для фиксированного радиуса эквивалентной сферы разница между предельными значениями величин блеска при изменении фазового угла от 0^0 до 90^0 составляет не более 1^m,3 звѐздной величины.

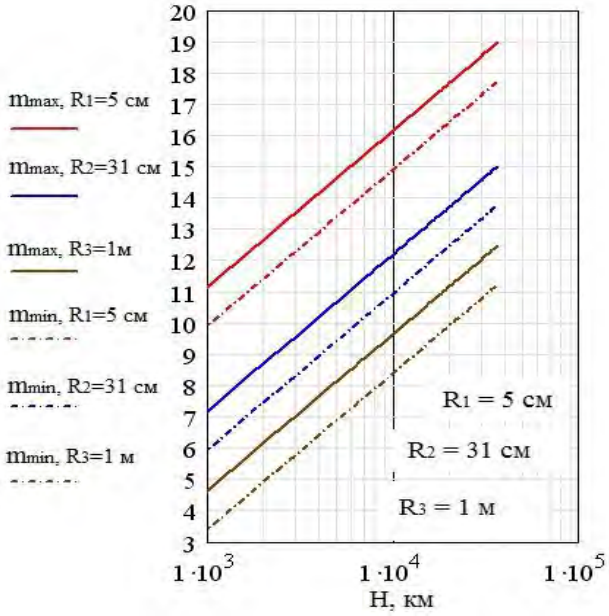

Рис. 5 – Зависимость предельных значений блеска КО
от его высоты над поверхностью Земли

Вычисленные значения различных величин блеска $m_{КО}$, обусловленные радиусами $R_{сф}$ эквивалентной сферы от 5 см до 75 см, для высот орбит КО 600, 2100, 10100 и 40000 километров приведены в таблице 1. Там же представлены значения площадей полусфер $S_{сф}$, значения эффективных поверхностей рассеяния L и радиусов $r_{ЭПР}$, вычисленных для случая представления ЭПР площадью круга.

Формально можно было бы условиться, что к МР КО могут быть отнесены объекты, имеющие эффективную поверхность рассеяния менее 1 м^2, массу – менее 100 кг, а радиус эквивалентной сферы менее 60-70 см. Однако такая классификация не отражает связь между блеском КО и возможностью его обнаружения [1, 2]. Например, КО с $R_{сф}$ = 5 см, явно относящийся к классу МР КО, на высоте орбиты 600 км, имея блеск 8^m,8 – 10^m, может быть обнаружен оптико-электронными средствами, имеющими проницающую способность гораздо выше.

Результаты моделирования в материале получены на основе применения усовершенствованной модели функционирования оптико-электронного информационного средства обнаружения космического мусора. В отличие от существующей модели усовершенствованная модель учитывает форму и размер запускаемого КА и позволяет получать прогнозируемые предельные значения блеска КА при выводе его на заданную орбиту.

Результаты моделирования показали, что принадлежность КО к классу МР ещѐ ничего не говорит о возможности или невозможности его обнаружения.

Таблица 1. – Значения площадей полусфер, эффективных поверхностей рассеяния и радиусов, вычисленных для случая представления ЭПР площадью круга

$R_{сф}$, см	$S_{псф}$, м^2	$r_{ЭПР}$, см	L, м^2	m, зв. величина			
				H, км			
				600, км	2100, км	10100, км	40000, км
5	0.02	3.9	0,005	8^m, 8	11^m, 5	15^m	17^m, 9
7	0.03	5,4	0,009	8^m,1	10^m,8	14^m,2	17^m,2
10	0,06	7,7	0,02	7^m,3	10^m	13^m,4	16^m,4
15	0,14	11,6	0,04	6^m,4	9^m,2	12^m,6	15^m,5
20	0,25	15,5	0,08	5^m,8	8^m,5	11^m,9	14^m,9
25	0,39	19,4	0,12	5^m,3	8^m	11^m,5	14^m,4
30	0,57	23,2	0,17	4^m,9	7^m,6	11^m,1	14^m
35	0,77	27,1	0,23	4^m,6	7^m,3	10^m,7	13^m,7
40	1	31	0,3	4^m,3	7^m	10^m,4	13^m,4
45	1,27	34,9	0,38	4^m	6^m,8	10^m,2	13^m,1
50	1,57	38,7	0,47	3^m,8	6^m,5	10^m	12^m,9
55	1,9	42,6	0,57	3^m,6	6^m,3	9^m,7	12^m,7
60	2,26	46,5	0,68	3^m,4	6^m,1	9^m,6	12^m,5
65	2,65	50,3	0,8	3^m,2	6^m	9^m,4	12^m,3
70	3,08	54,2	0,9	3^m,1	5^m,8	9^m,2	12^m,2
75	3,5	58,1	1,06	2^m,9	5^m,7	9^m,1	12^m

Для каждого конкретного типа ОЭС и их характеристик следует оценить возможность обнаружения светового потока, формируемого поверхностью объекта, на фоне распределѐнного по полю зрения фонового излучения. Таким образом, применение усовершенствованной модели позволит получать прогнозируемые оценки блеска КА и повысить качество их идентификации на основе данных о форме, массе и материале поверхности аппарата.

Литература

1. Оптико-электронные астрофизические наблюдения в условиях помех: монография / В. Н. Фомин, В. М. Никитин, Е. Г. Коломийцев. Москва: Изд. Московского университета, 2012.
2. **Аношко Ю.Г., Дрига В.В., Калыш Г.Ф., Ковалѐв А.А., Е.Г. Коломийцев, Подгорных Ю.Д., Фролов О.П.** Системотехнические основы построения вооружения РКО. Часть 1. Системотехнические основы построения систем вооружения ККП. Тверь, ВУ ПВО, 2004.
3. **Фомин В.Н., Никитин В.М., Коломийцев Е.Г.** Обнаружение - измерение оптических сигналов в условиях помех при ограниченном динамическом диапазоне фотоприемника // Изв. ВУЗов. Сер. Физика. 2010 № 12-2. С. 258-266.

4. **Пятков В.В., Чеботарь И.В., Гудаев Р.А., Куликов С.В., Фаттахов Р.Р.** Модель функционирования оптико-электронного информационного средства обнаружения космического мусора // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19. № 4. С. 5-13. DOI: https://doi.org/10.18127/j20700814-202104-01.